JCSS
Japan Calibration
Service System

JCSS
不確かさ見積もりに関するガイド
登録に係る区分：流量・流速

（第5版）

（JCG208S11―05）

改正：2026年4月1日

独立行政法人製品評価技術基盤機構
適合性評価推進センター　認定センター

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

目　次

1. 秤量法による液体（水）流量の校正における不確かさの評価事例 3
2. 標準流量計による石油用流量計の校正における不確かさの評価事例 15
3. 有効自由度の取扱い事例 35

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

1. 秤量法による液体（水）流量の校正における不確かさの評価事例

1.1 はじめに

本評価事例では、ダイバータを使用した静的な秤量法により体積流量を算出し、この体積流量から K ファクタ（Pulse/L）を算出することを前提とした不確かさの評価方法を示す。ここではパルスの計数は二重計時法（ダブルクロノメトリ）を用いない場合の評価を行う。質量流量に対するＫファクタを算出する場合の不確かさ評価は、本評価方法から密度の補正を省略することにより行われる。なお、秤量法による校正方法の詳細は ISO-4185[(1)]等を参照とされたい。また、本評価事例における不確かさバジェットシートの記載方法は、ISO-5168[(2)]による。

1.2 Ｋファクタの算出

被校正流量計の体積流量に対するＫファクタを以下の式により算出する。

$$K_{\mathrm{f}} = \frac{I_{\mathrm{P}}}{1000 t_{\mathrm{P}}} \cdot \frac{1}{Q_{\mathrm{l}}} \tag{1.1}$$

ここで、 K_{f} : Kファクタ(Pulse/L)

Q_{l} : 流量計を通過する試験流体の体積流量($\mathrm{m^3/s}$)

t_{P} : パルスの測定時間(s)

I_{P} : t_{P}間において計測されるパルスの積算数(–)

体積流量 Q_{l} は秤量システムにより求める。質量流量を用いて表現すると、次のようになる。

$$Q_{\mathrm{l}} = \frac{q}{\rho_{\mathrm{wD}}} \tag{1.2}$$

$$q = \frac{\left(k_{\mathrm{f}} M_{\mathrm{f}} - k_{\mathrm{i}} M_{\mathrm{i}}\right)}{\left(1 - \rho_{\mathrm{air}} / \rho_{\mathrm{wT}}\right) t_{\mathrm{D}}} \tag{1.3}$$

ここで、 q : ラインの質量流量(kg/s)

$M_{\mathrm{i}}, M_{\mathrm{f}}$: 計測開始前および計測終了後の秤量計の指示値(kg)

$k_{\mathrm{i}}, k_{\mathrm{f}}$: 校正によって求められる秤量計の補正計数(–)

ρ_{air} : 秤量タンク周辺の空気密度($\mathrm{kg/m^3}$)

ρ_{wD} : 被試験流量計における水の密度($\mathrm{kg/m^3}$)

ρ_{wT} : 秤量タンクにおける水の密度($\mathrm{kg/m^3}$)

t_{D} : 秤量タンクへの水の流入時間(s)

二重計時法を採用しない場合、パルスの計数はダイバータの切り替えタイミングと同期して行うことから、$t_{\mathrm{P}} = t_{\mathrm{D}}$ となり、モデル式は次のようになる。

$$K_{\mathrm{f}} = \frac{I_{\mathrm{P}} \cdot \rho_{\mathrm{wD}}}{1000} \frac{\left(1 - \rho_{\mathrm{air}} / \rho_{\mathrm{wT}}\right)}{\left(k_{\mathrm{f}} \cdot M_{\mathrm{f}} - k_{\mathrm{i}} \cdot M_{\mathrm{i}}\right)} \tag{1.4}$$

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

なお、ここでは、被校正流量計から秤量タンクまでの区間において、試験流体の漏れはないこと、またこの区間に残存する空気等が膨張・収縮したり、管外へ排出されることによって生じる誤差がないものとして扱っている。以下に、上式の各値の算出ついて注意を要する点を解説する。

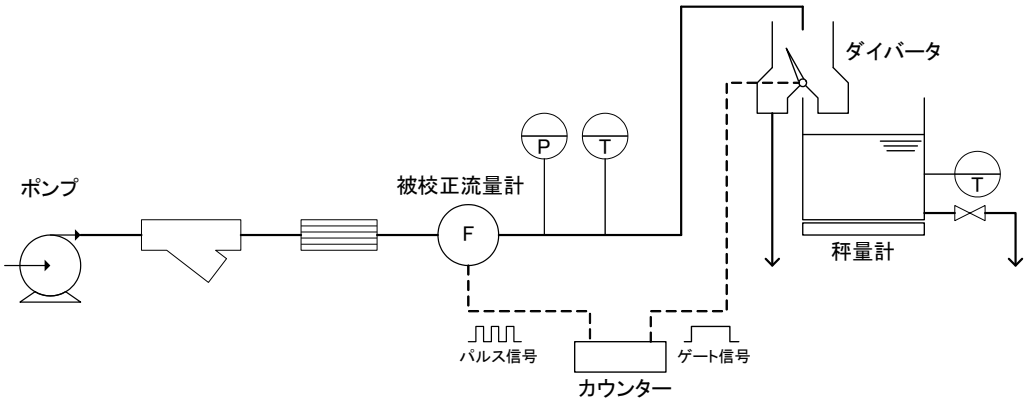


図 1.1　校正システム概要

●秤量計補正係数（k_f, k_i）

ここでは秤を、分銅を用いて校正することを前提とする。秤の校正方法等については、参考文献[3]を参照する。秤の校正時に用いられる分銅の質量は協定値で示されており、また分銅の密度と、実際に計測する水の密度が異なるために、浮力に対する補正を行わなくてはならない。したがって、補正係数 k は次のように示される。

$$k = \left(1 - \frac{\rho_{\mathrm{air,C}}}{\rho_{\mathrm{weight}}}\right) k_c \tag{1.5}$$

ここで、　$\rho_{\mathrm{air,C}}$: 秤の校正時における秤周囲の空気密度 $(\mathrm{kg/m^3})$

ρ_{weight} : 分銅の密度 $(\mathrm{kg/m^3})$

k_c : 校正によって得られる補正係数 $(-)$

●水の密度（$\rho_w(T)$）

試験流体は水を対象とする。密度計測は、振動式密度計や密度浮標によって行われるが、要求する不確かさの程度によって、その校正方法を選択する。

使用する水の密度と純水の密度との差を補正値として求め、この値と例えば下記に示される純水の密度算出式[4]から（各係数は参考文献を参照）、使用する水の密度を求める。

$$\rho_{\mathrm{pw}}(T) = a_5 \left[1 - \frac{(T + a_1)^2 (T + a_2)^2}{a_3 (T + a_4)}\right] \tag{1.6}$$

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

ここで、　　ρ_{pw} : 純水の密度(kg/m^3)

試験流体の密度は、以下の式により算出される。

$$\rho_w(T) = \rho_{pw}(T) - \rho_c \tag{1.7}$$

ここで、　　ρ_c : 密度の補正値(kg/m^3)

一般的には、微量の不純物により水の膨張係数は変化しないので、補正値は温度に関わらず一定とみなして差し支えない。

秤量計が大気開放であるのに対して、被校正流量計内部の圧力は大気圧よりも高くなるので、体積流量計を対象として不確かさの小さい校正を目指す場合には、液体の圧縮性に関する補正が必要となる。被校正流量計における水の密度ρ_{wD}は例えば下式に基づき評価される[4]。

$$\rho_{wD} = C_P \cdot \rho_w(T_1) \tag{1.8}$$

$$C_P = 1 + (b_0 + b_1 T_1 + b_2 T_1^2) P_1 \tag{1.9}$$

ここで、　　C_P : 圧縮係数(–)
T_1 : 配管内水温(°C)
P_1 : 被試験流量計内部の静水圧（ゲージ圧)(Pa)

● タンクへの流入時間（t_D）

タンクへの流入時間 t_D は次の式のように考えることができる。

$$t_D = t_{Dm} + t_{Dc} \tag{1.10}$$

ここで、　　t_{Dm} : ダイバータ切替信号の時間間隔(s)
t_{Dc} : ダイバータの流路切替によって生じる補正時間(s)

補正時間 t_{Dc} は、一般的には ISO4185-1980[1]に基づいて算出される。t_{Dc} の期待値が零であるために、(1.4)式中には明示されていないが、1.3 節の不確かさ解析においては、この補正時間に対する不確かさを考慮しなくてはならない。

1.3 不確かさ解析事例

本章では、これまで述べてきた流量校正設備の不確かさ解析について述べるものとする。なお、不確かさ解析の評価事例にあたっての校正条件を、常用的な範囲として、水温 10 °C～30 °C、配管内圧力（ゲージ圧）0.1 MPa～0.3 MPa とする。また、流量計の校正設備として具有すべき前提条件、または試験を行うにあたって満たしているべき条件を以下に示す。

・計測中の被校正流量計における流量は一定である。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

・被校正流量計においては、旋回流れや偏流などはなく、十分に発達した乱流となっている。

・管路は満水状態であり、気泡等は混入していない。

・被校正流量計から秤量タンクまでの間に試験流体の漏れは一切ない。

・デッドボリュームは十分に小さく、その影響はない。

以上に関しては、これが成立しているものとして、これらの不確かさについては考えないものとする。

(1.4)式から、K ファクタの相対標準不確かさは、以下のように示される。

$$\frac{u_c(K_f)}{K_f} = \sqrt{\left(\frac{u(I_P)}{I_P}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho_{wD})}{\rho_{wD}}\right)^2 + \left(\frac{u(k_f M_f - k_i M_i)}{k_f M_f - k_i M_i}\right)^2 + \left(\frac{u(1-\rho_{air}/\rho_{wT})}{1-\rho_{air}/\rho_{wT}}\right)^2 + \left(\frac{u(t_{Dc})}{t_{Dc}}\right)^2} \qquad (1.11)$$

ここで、　　t_{Dc} :ダイバータの流路切替によって生じる補正時間(s)

ダイバータのタイミングエラーによる不確かさについては、前述のように期待値は零であるが、上式のように考慮する必要がある。

A. パルス計数に関する不確かさ

ダイバータの切り替えタイミングに同期してパルス計数する場合には、少なくとも 1 パルスの過計数または欠落を生じる可能性がある。一回の計測において、1 パルスのエラーが生じるものとした場合の不確かさの推定を下記に示す。また、相対標準不確かさは、最低でも 20000 パルス計測することとして算出した。

表 1.1　パルス計数に関する不確かさ

要因	記号	入力	除数	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 c_i	全体の不確かさに対する寄与 $[c_i \cdot u(x_i)]^2$
パルス数	I_p	1　－	$\sqrt{6}$	0.41　－	1	0.17
合成標準不確かさ				0.41　－		0.17
相対標準不確かさ　(I_p=20000)				2.0×10^{-5}		

B. 被校正流量計における密度に関する不確かさ

式(1.6)から、水の密度の不確かさは下記のような式により表現される。なお、式(1.5)における不確かさは十分に小さいので、無視できる。また、圧縮性については、その不確かさへの寄与は十分に小さいので、無視して差し支えない。

$$u(\rho_w(T)) = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_{pw}(T)}{\partial T} u(T)\right)^2 + u(\rho_c)^2} \qquad (1.12)$$

式(1.12)中右辺第一項の $u(T)$は配管内温度の計測に対する不確かさである。この事例では、(B-1)に示すように、0.17 °C とした。$u(T)$の感度係数に関しては、式(1.6)が温度 T の関数となっているために、

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

温度ごとに値が異なる。実用的な校正温度範囲を 10 °C～30 °C として、感度係数が最大になる 30 °C を評価事例として採用することとする。また、第二項の密度の補正値ρ_c の不確かさについては、(B-2)に示すように 0.032 kg/m^3 とする。

密度に関する不確かさのバジェットシートを次に示す。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

表 1.2 被校正流量計における密度に関する不確かさ

要因	記号	入力	除数	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 c_i	全体の不確かさに対する寄与 $[c_i \cdot u(x_i)]^2 \times 10^{-3}$
温度測定	T	0.17 °C	1	0.17 °C	−0.30	2.60
密度補正値	ρ_c	0.032 kg/m^3	1	0.032 kg/m^3	1	1.02
合成標準不確かさ				0.060 kg/m^3		3.63
相対標準不確かさ （ρ_{wD}=998）				6.0×10^{-5}		

(B−1) 配管内の水温の温度計測の不確かさ

配管内における水温 T_l は被校正流量計の近傍にて計測されているものとすると、温度計の校正の不確かさ($u(T_m)$)と、温度計指示値のばらつき（試験中の温度変動）($u(\delta T_m)$)による不確かさを合成して算出する。

$$u(T) = \sqrt{u(T_m)^2 + u(\delta T_m)^2} \tag{1.13}$$

温度計の不確かさについては、温度計の校正($u(T_{m,c})$)の不確かさ、分解能に関する不確かさ($u(T_{m,r})$)、校正周期間の経時変化($u(T_{m,d})$)が主要因になる。その他、校正結果から内挿等による補正式を用いる場合は内挿式の不確かさ、校正時と実使用状態の違いによる不確かさ（例えばケーブルの長さ、外気温による影響）などが要因として挙げられる。これらは分解能 0.1 °C 程度の温度計であれば明示的には観測されないので、通常無視できる。環境条件等考慮して、必要に応じて不確かさに組み込む。

$$u(T_m) = \sqrt{u(T_{m,c})^2 + u(T_{m,r})^2 + u(T_{m,d})^2} \tag{1.14}$$

評価事例として、分解能 0.1 °C、JCSS 校正における校正の標準不確かさが $u(T_{m,c})$ = 0.05 (°C)、仕様書や校正周期前後の校正証明書から校正周期間の経時変化が±0.2 °C の幅であると推定される温度計を使用するとする。この温度計の指示値のばらつき、または試験中の温度変化の最大幅は±0.2 °C と計測されたものとする。配管中の温度計測の不確かさのバジェットシートを次に示す。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

表 1.3 配管内の水温の温度計測の不確かさ

要因	記号	入力	除数	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 c_i	全体の不確かさに対する寄与 $[c_i \cdot u(x_i)]^2 \times 10^{-3}$
温度計の分解能	$T_{m,r}$	0.05 °C	$\sqrt{3}$	0.03 °C	1	0.83
温度計の校正	$T_{m,c}$	0.05 °C	1	0.05 °C	1	2.50
温度計の経時変化	$T_{m,d}$	0.2 °C	$\sqrt{3}$	0.12 °C	1	13.33
指示値のばらつき	δT_m	0.2 °C	$\sqrt{3}$	0.12 °C	1	13.33
合成標準不確かさ				0.17 °C		30.00

(B-2) 密度の補正値の不確かさ

式(1.7)右辺第二項の密度の補正値ρ_cについては、以下により示される

$$\rho_c = \rho_s - \rho_m \tag{1.15}$$

ここで、 ρ_s : 基準となる密度(kg/m^3)

ρ_m : 使用する水の密度計による計測値(kg/m^3)

密度の補正値の測定周期間における経時変化($\Delta\rho_d$)を加味すると、密度の補正値の標準不確かさは次のように示すことができる。

$$u(\rho_c) = \sqrt{u(\rho_s)^2 + u(\rho_m)^2 + u(\Delta\rho_d)^2} \tag{1.16}$$

基準となる密度については、JCSS 校正された密度標準液を用いる場合と、式(1.6)を用いて算出する方法のいずれかになる。前者の場合は、密度計を用いて密度標準液と使用する水の密度の差を計測する。密度計は比較器として使用されることになるので、分解能による不確かさの他、繰り返し試験等から再現性を確認し、これらを不確かさに組み込む必要がある。

後者の場合は、密度計を JCSS 校正する。右辺第二項の密度計の不確かさでは、校正の不確かさ、分解能に依存した不確かさ、校正周期間の経時変化が主要な不確かさ要因となる。

この評価事例では、基準となる密度については、式(1.6)を用いて算出することとする(したがって、基準となる密度の不確かさは無視できる)。また、密度測定には分解能 0.01 kg/m^3、校正周期間の経時変化が ±0.03 kg/m^3 の振動式密度計を用い、これを JCSS 校正するとして、その校正の標準不確かさは $u(\rho_{cal}) = 0.02$ (kg/m^3)、とする。また、校正周期間の密度補正値の変化は±0.03 kg/m^3 の範囲であったとする。以上の場合の不確かさバジェットシートを次に示す。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

表 1.4 密度の補正値の不確かさ

要因	記号	入力	除数	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 c_i	全体の不確かさに対する寄与 $[c_i \cdot u(x_i)]^2$ ×10^{-4}
密度計の分解能	ρ_r	0.005 kg/m^3	$\sqrt{3}$	0.003 kg/m^3	1	0.08
密度計の校正	ρ_{cal}	0.02 kg/m^3	1	0.02 kg/m^3	1	4.00
密度計の経時変化	ρ_d	0.03 kg/m^3	$\sqrt{3}$	0.017 kg/m^3	1	3.00
密度補正値の経時変化	$\rho_{c,d}$	0.03 kg/m^3	$\sqrt{3}$	0.017 kg/m^3	1	3.00
合成標準不確かさ				0.032 kg/m^3		10.08

C. 質量計測に関する不確かさ

質量計測に関する不確かさは、式(1.11)右辺第三項から、次のようになる。

$$u(k_f M_f - k_i M_i)^2 = \left(M_f u(k_f)\right)^2 + \left(k_f u(M_f)\right)^2 + \left(M_i u(k_i)\right)^2 + \left(k_i u(M_i)\right)^2 \quad (1.17)$$

$u(M_i)$および $u(M_f)$ は秤量計に起因する不確かさ、$u(k)$は秤量計の校正係数の標準不確かさである。

秤量計の不確かさについては(C-1)、秤量計の校正係数に関する不確かさは(C-2)に示されるように推定される。バジェットシートを次に示す。

表 1.5 質量計測に関する不確かさ

要因	記号	入力	除数	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 c_i	全体の不確かさに対する寄与 $[c_i \cdot u(x_i)]^2$ ×10^{-2}
秤(初期値)	M_i	0.30 kg	1	0.30 kg	1	9.0
秤(終了値)	M_f	0.37 kg	1	0.37 kg	1	13.7
校正係数(初期値)	k_i	0.0001 −	1	0.0001 kg	2000	4.0
校正係数(終了値)	k_f	0.0001 −	1	0.0001 kg	6000	36.0
合成標準不確かさ				0.79 kg		62.7
相対標準不確かさ ($k_f M_f - k_i M_i \approx 4000$)				1.98×10^{-4}		

(C-1) 秤量計の不確かさ

本節では秤量計の不確かさ評価を示す。秤量計の不確かさにおいて考慮すべきは、分解能に関する不確かさの他、環境安定性や経時変化、偏置荷重等を考慮する必要がある。

分解能 0.1 kg、最大秤量 6000 kg とする秤量計を用いる場合の評価事例を示す。なお、ここでは、風袋質量が 2000 kg、満水時質量が 6000 kg であるとして、不確かさの推定を行う。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

環境安定性として温度特性を考慮する。室温の温度範囲が常用的に±5 °C の範囲にて校正が行われるとする。秤の温度特性が 0.001 %/K と仕様書から読み取れるとすると、環境安定性に関する不確かさが、風袋時および満水時それぞれに対して下記のように推定される。

$$u(M_{\mathrm{Ti}}) = \frac{1.0\times10^{-5}\times5\times2000}{\sqrt{3}} = 0.06\,(\mathrm{kg}),\ u(M_{\mathrm{Tf}}) = \frac{1.0\times10^{-5}\times5\times6000}{\sqrt{3}} = 0.17\,(\mathrm{kg}) \qquad (1.18)$$

経時変化に関しては、校正周期の間に±0.5 kg の幅の変動があるとする。

偏置荷重により生じる不確かさは、後述の秤の校正における偏置荷重に関する試験から推定する。ここでは偏置荷重による相対標準不確かさが 0.0025 %と推定されたとして、以下のように標準不確かさを推定されたとする。

$$u(M_{\mathrm{ei}}) = 2.5\times10^{-5}\times2000 = 0.05\,(\mathrm{kg}),\ u(M_{\mathrm{ef}}) = 2.5\times10^{-5}\times6000 = 0.15\,(\mathrm{kg}) \qquad (1.19)$$

秤量計の不確かさバジェットシートを、初期値(風袋時)、終了値(満水時)それぞれについて次に示す。

表 1.6 秤量計の不確かさ(初期値)

要因	記号	入力	除数	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 c_i	全体の不確かさに対する寄与 $[c_i\cdot u(x_i)]^2$ ×10⁻³
秤量計の分解能	M_r	0.05 kg	$\sqrt{3}$	0.03 kg	1	0.83
秤量計の温度特性	M_{Ti}	0.1 kg	$\sqrt{3}$	0.06 kg	1	3.33
秤量計の経時変化	M_d	0.5 kg	$\sqrt{3}$	0.29 kg	1	83.33
偏置荷重	M_{ei}	0.05 kg	1	0.05 kg	1	2.50
合成標準不確かさ				0.30 kg		90.00

表 1.7 秤量計の不確かさ(終了値)

要因	記号	入力	除数	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 c_i	全体の不確かさに対する寄与 $[c_i\cdot u(x_i)]^2$ ×10⁻³
秤量計の分解能	M_r	0.05 kg	$\sqrt{3}$	0.03 kg	1	0.83
秤量計の温度特性	M_{Tf}	0.3 kg	$\sqrt{3}$	0.17 kg	1	30.00
秤量計の経時変化	M_d	0.5 kg	$\sqrt{3}$	0.29 kg	1	83.33
偏置荷重	M_{ef}	0.15 kg	1	0.15 kg	1	22.50
合成標準不確かさ				0.37 kg		136.67

(C-2) 校正係数の不確かさ

秤量計の校正係数の標準不確かさ $u(k)$は、式(1.5)から、

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

$$u(k)=\sqrt{\left(\frac{\partial k}{\partial \rho_{\mathrm{weight}}}u\left(\rho_{\mathrm{weight}}\right)\right)^2+\left(\frac{\partial k}{\partial \rho_{\mathrm{air,C}}}u\left(\rho_{\mathrm{air,C}}\right)\right)^2+\left(\frac{\partial k}{\partial k_{\mathrm{c}}}u\left(k_{\mathrm{c}}\right)\right)^2} \tag{1.20}$$

により算出される。$u(\rho_{\mathrm{weight}})$が分銅の密度の不確かさ、$u(\rho_{\mathrm{air,C}})$が空気密度の不確かさ、$u(k_{\mathrm{c}})$が校正係数の不確かさ、すなわち秤量計の校正の不確かさになる。このうち、第一項、第二項における寄与は十分に小さく無視できるので、第三項の校正の不確かさのみを考慮すればよい。

校正の不確かさについては、参考文献(3)に基づいてJCSS校正された分銅を用いて校正を行うか、またはJCSS 校正を受けることが一般的である。この校正では、秤の繰り返し性や直線性についての不確かさが含まれた結果を得ることができる。ここでは、JCSS 校正の結果および再現性を考慮して、秤の校正による補正係数の不確かさを次のように推定する。

$$u(k_{\mathrm{i}})=u(k_{\mathrm{f}})=1.0\times10^{-4} \tag{1.21}$$

D. 浮力補正

浮力補正の不確かさについて以下に示す。浮力補正に関する標準不確かさは次のようになる。

$$u\left(1-\frac{\rho_{\mathrm{air}}}{\rho_{\mathrm{wT}}}\right)=\sqrt{\left(\frac{1}{\rho_{\mathrm{wT}}}\right)^2u(\rho_{\mathrm{air}})^2+\left(-\frac{\rho_{\mathrm{air}}}{\rho_{\mathrm{wT}}{}^2}\right)^2u(\rho_{\mathrm{wT}})^2} \tag{1.22}$$

したがって、秤量タンク周囲の空気密度、秤量タンク内の水の密度に関する不確かさを推定する必要がある。

空気密度を、算出式を使用して算出する場合には、温度や湿度の秤量タンク周囲の均一性に関する補正値（特に秤量タンクが大規模の場合）や、式自体が持つ不確かさを考慮しなくてはならない。特に感度係数の観点から、空気密度の寄与は大きいので、注意する必要がある。

以上から、空気密度は定数とするのが扱い易い。例えば実際の測定環境下（大気圧 96 kPa ~106 kPa、秤量タンク周辺温度 5 °C ~30 °C）では、ρ_{air}はおよそ 1.10 kg/m^3~1.33 kg/m^{3}の範囲で変化する可能性があるが、平均値としてρ_{air}=1.21±0.12 (kg/m^3)の範囲に均等に分布するとして不確かさを推定する。この場合、注意しなくてはならないのは、設備の設置されている標高によって当然ながら大気圧が異なることで、年間を通じた平均的な大気圧を予め調査しておく必要がある。

一方で、水の密度に関しては、その感度係数から類推されるように不確かさへの寄与は小さい。そのため、秤量タンク内の水温にばらつきがあったとしても、これは十分に無視できるものと推定される。したがって、ここでは秤量タンク内の水温は一定であるとして扱うこととする。タンク内の水の密度の不確かさは、(B)において推定された配管内の水の密度の不確かさと同様とすればよい。

浮力補正に関する不確かさバジェットシートを次に示す。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

表 1.8 浮力補正に関する不確かさ

要因	記号	入力	除数	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 c_i	全体の不確かさに対する寄与 $[c_i \cdot u(x_i)]^2$ ×10⁻⁹
空気密度	ρ_{air}	0.12 kg/m³	$\sqrt{3}$	0.069 kg/m³	0.00100	4.8
水の密度	ρ_{wT}	0.060 kg/m³	1	0.060 kg/m³	−1.2×10⁻⁶	0.0
合成標準不確かさ				6.9×10⁻⁵		4.8
相対標準不確かさ （1−ρ_{air}/ρ_w=0.9989）				7.0×10⁻⁵		

E. ダイバータタイミングエラーに関する不確かさ

補正時間は参考文献(1)に記述される試験から実測される。ここでは、全流量範囲における補正時間が、最大 0.01 s であったものとして不確かさを推定する。補正時間の相対標準不確かさは、最短の計測時間を 60 s とし、次のように推定される。

表 1.9 ダイバータタイミングエラーに関する不確かさ

要因	記号	入力	除数	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 c_i	全体の不確かさに対する寄与 $[c_i \cdot u(x_i)]^2$ ×10⁻⁵
タイミングエラー	t_{Dc}	0.01 −	$\sqrt{3}$	0.006 −	1	3.33
合成標準不確かさ				0.006 −		3.33
相対標準不確かさ （t_D=60）				9.6×10⁻⁵		

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

F. 合成標準不確かさ

以上の評価事例に基づき算出された不確かさから、最終的な不確かさバジェットシートは次のようになる。

表 1.10 合成標準不確かさ

要因	記号	標準不確かさ	値	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 c_i	全体の不確かさに対する寄与 $\left[c_i \cdot u(x_i)\right]^2 \times 10^{-9}$
パルス計数	I_p	0.41 −	20000	2.0×10^{-5}	1	0.42
配管内密度	$\rho_w(T)$	0.060 kg/m^3	998	6.0×10^{-5}	1	3.60
秤量タンク内の水の質量	$k_f M_f - k_i M_i$	0.79 kg	4000	1.98×10^{-4}	1	39.17
浮力補正	$1-\rho_{air}/\rho_w$	6.9×10^{-5} −	0.9989	7.0×10^{-5}	1	4.83
タイミングエラー	t_{Dc}	0.006 −	60	9.6×10^{-5}	1	9.26
合成標準不確かさ				2.4×10^{-4}		57.69
拡張不確かさ （k=2）				4.8×10^{-4}		

1.4 参考文献

1） ISO−4185 Measurement of fluid flow in closed conduits

2） ISO−5168 Measurement of fluid flow − Procedures for the evaluation of uncertainties

3） JCG203S21 不確かさの見積もりに関するガイド（はかり）

4） M. Tanaka et al. Recommended table for the density of water between 0 °C to 40 °C based on recent experimental reports, Metrologia, 2001,38, 301−309

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

2. 標準流量計による石油用流量計の校正における不確かさの評価事例

2.1 はじめに

本評価事例では、特定二次標準器またはワーキングスタンダードとして校正された標準流量計を用いて、被校正流量計の K ファクタ（Pulse/L）を算出する場合の不確かさの評価方法を示す。ここでは標準流量計、被校正流量計ともにパルス発信型であり、直列に配管された被校正流量計と標準流量計に安定した一定流量を流し続けながらパルスを二重計時法により計測して比較する校正方法を前提とした。

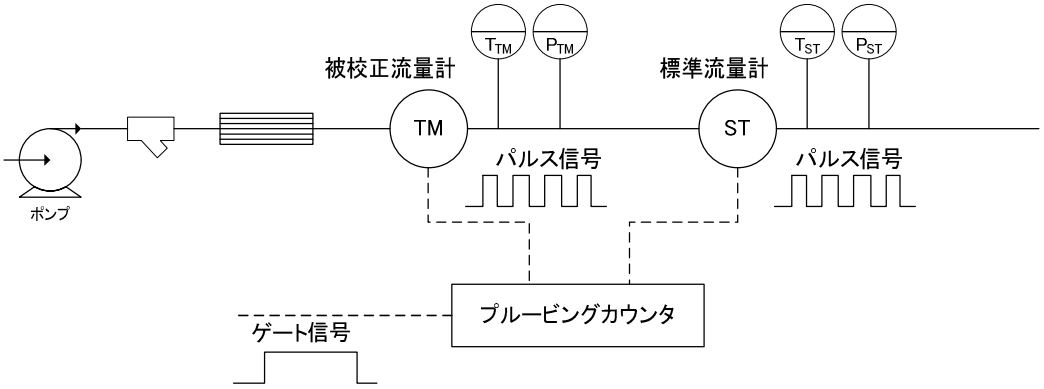


図 2.1 マスターメータ法による校正システムの概要

2.2 K ファクタの算出

被校正流量計と標準流量計の間の接続管路において、試験流体の漏れがなく、気相の発生、膨張、収縮、管外への排出によって生じる誤差がないと仮定すると、質量保存の法則により、下記の関係式が成立する。

$$Q_{TM} = Q_{ST} + \frac{\partial(\rho_{DV} V_{DV})}{\partial t} \tag{2.1}$$

これを計測時間 t_D で積分すると次式となる。

$$\int_0^{t_D} Q_{TM}\,dt = \int_0^{t_D} Q_{ST}\,dt + \int_0^{t_D} \frac{\partial(\rho_{DV} V_{DV})}{\partial t}\,dt \tag{2.2}$$

$$\overline{Q_{TM}} \cdot t_D = \overline{Q_{ST}} \cdot t_D + \Delta M_{LDV} \tag{2.3}$$

ここで、 Q_{TM}, Q_{ST} : 流量計を通過する試験流体の質量流量(kg/s)

t_D : ゲート信号による計測時間(s)

ρ_{DV} : 接続管路内試験流体の平均密度(kg/m^3)

V_{DV} : 接続管路の体積(m^3)

ΔM_{LDV} : 接続管路内試験流体の試験開始から終了までの質量変化量(kg)

$\overline{\square}$:（記号に対する上付き横棒線） 計測時間中の平均値

$_{TM}$: 被校正流量計における量

$_{ST}$: 標準流量計における量

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

質量流量の時間平均値は計測時間で時間平均された密度値と体積流量の時間平均値との積、及び流量と密度変動の相関に伴う影響分に分けられるが、ここでは流量変動、密度変動は十分に小さい設備であると仮定して無視する。したがって次式で表される。

$$\overline{Q_{TM}} = \overline{\rho_{TM} q_{TM}} \tag{2.4}$$

$$\overline{Q_{ST}} = \overline{\rho_{ST} q_{ST}} \tag{2.5}$$

ここで、 ρ_{TM}, ρ_{ST} : 流量計における試験流体の密度(kg/m^3)

q_{TM}, q_{ST} : 流量計を通過する試験流体の体積流量(m^3/s)

従って関係式は次のようになる。

$$\overline{\rho_{TM} q_{TM}} = \overline{\rho_{ST} q_{ST}} + \frac{\Delta M_{LDV}}{t_D} \tag{2.6}$$

ここで、流量変動と密度変動に伴う影響分は無視したが、流動状態が大きい場合には別途考慮する必要がある。従って、被校正流量計を通過する体積流量は次式で表される。

$$\begin{aligned} \overline{q_{TM}} &= \frac{\overline{\rho_{ST}}}{\overline{\rho_{TM}}} \overline{q_{ST}} + \frac{\Delta M_{LDV}}{\overline{\rho_{TM}} t_D} \\ &= \frac{\overline{\rho_{ST}} \overline{q_{ST}}}{\overline{\rho_{TM}}} \left(1 + \frac{\Delta M_{LDV}}{\overline{\rho_{ST}} \overline{q_{ST}} \cdot t_D} \right) \end{aligned} \tag{2.7}$$

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

被校正流量計の K ファクタは次のようになる。

$$
\begin{aligned}
K_{fTM} &= \frac{f_{pTM}}{1000 \cdot \overline{\overline{q_{TM}}}} \\
&= \frac{f_{pTM}}{1000 \cdot \dfrac{\overline{\overline{\rho_{ST} q_{ST}}}}{\overline{\overline{\rho_{TM}}}} \left(1 + \dfrac{\Delta M_{LDV}}{\overline{\overline{\rho_{ST} q_{ST}}} \cdot t_D} \right)} \\
&\approx \frac{\overline{\overline{\rho_{TM}}}}{\overline{\overline{\rho_{ST}}}} \cdot \frac{f_{pTM}}{f_{pST}} \cdot K_{fST} \left(1 - \frac{\Delta M_{LDV}}{\overline{\overline{\rho_{ST} q_{ST}}} \cdot t_D} \right) \\
&= \frac{\overline{\overline{\rho_{TM}}}}{\overline{\overline{\rho_{ST}}}} \cdot \frac{I_{pTM}}{t_{pTM}} \cdot \frac{t_{pST}}{I_{pST}} \cdot K_{fST} \left(1 - \frac{\Delta M_{LDV}}{\overline{\overline{\rho_{ST} q_{ST}}} \cdot t_D} \right)
\end{aligned}
\qquad (2.8)
$$

ここで、 f_{pTM}, f_{pST} : パルス発信周波数(Pulse/s)

K_{fTM}, K_{fST} : 体積流量計のKファクタ(Pulse/L)

I_{pTM}, I_{pST} : 計数されたパルス数(Pulse)

t_{pTM}, t_{pST} : 計数されたパルスの時間間隔(s)

ここでは、接続管路内の質量変化の項は、校正値算出においては補正しないこととする。したがって被校正流量計のKファクタは次のように表すことができる。補正されなかった接続管路内の質量変化の項の影響については、不確かさ解析の中で評価する。

$$
K_{fTM} = \frac{\overline{\overline{\rho_{TM}}}}{\overline{\overline{\rho_{ST}}}} \cdot \frac{I_{pTM}}{I_{pST}} \cdot \frac{t_{pST}}{t_{pTM}} \cdot K_{fST} \qquad (2.9)
$$

校正は同じ流量において繰返しn回の校正を実施し、算出される K ファクタの平均値によって校正結果を算出する。

$$
\overline{K_{fTM}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} K_{fTM,i} \qquad (2.10)
$$

流量計の指示値と標準との偏差（器差）を算出する場合には、校正された K ファクタおよび、指示値に使われる公称 K ファクタにより、以下の式で算出することができる。

$$
E = \frac{K_{fTM} - K_{fTM,nom}}{K_{fTM,nom}} \times 100 \quad (\%) \qquad (2.11)
$$

ここで、 $K_{fTM,nom}$: 被校正流量計の指示値に使われる公称Kファクタ(Pulse/L)

以下に(2.9)式の算出に必要な密度比及び校正時の条件での標準流量計の K ファクタの算出式を示す。

●試験流体の平均密度の推定

被校正流量計および標準流量計を通過する試験流体の平均密度はそれぞれ次式で表される。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

$$\overline{\rho_{TM}} = \rho_{REF} \cdot \left\{1 - \alpha_L \cdot \left(\overline{T_{TM}} - T_{REF}\right) + \beta_L \cdot \overline{p_{TM}}\right\} \tag{2.12}$$

$$\overline{\rho_{ST}} = \rho_{REF} \cdot \left\{1 - \alpha_L \cdot \left(\overline{T_{ST}} - T_{REF}\right) + \beta_L \cdot \overline{p_{ST}}\right\} \tag{2.13}$$

ここで、 ρ_{REF} : 試験流体の参照温度での密度(kg/m^3)
α_L : 試験流体の温度による熱膨張係数(/℃)
T_{REF} : 参照温度(℃)
T_{TM}, T_{ST} : 流量計における試験流体の温度(℃)
p_{TM}, p_{ST} : 流量計における試験流体の圧力(MPa)
β_L : 試験流体の圧力による圧縮係数(/MPa)

被校正流量計と標準流量計における試験流体の平均密度の相対値は次のようになる。

$$\begin{aligned}\frac{\overline{\rho_{TM}}}{\overline{\rho_{ST}}} &= \frac{\rho_{REF} \cdot \left\{1 - \alpha_L \cdot \left(\overline{T_{TM}} - T_{REF}\right) + \beta_L \cdot \overline{p_{TM}}\right\}}{\rho_{REF} \cdot \left\{1 - \alpha_L \cdot \left(\overline{T_{ST}} - T_{REF}\right) + \beta_L \cdot \overline{p_{ST}}\right\}} \\ &\approx 1 - \alpha_L \cdot \left(\overline{T_{TM}} - \overline{T_{ST}}\right) + \beta_L \cdot \left(\overline{p_{TM}} - \overline{p_{ST}}\right)\end{aligned} \tag{2.14}$$

ここでは、この式を用いて密度比を補正する場合の補正量の不確かさを考慮する。

●試験流体の温度による熱膨張係数の推定

試験流体の熱膨張係数の求め方には、(1)文献値を利用する方法、(2)試験流体をサンプリングして実際に校正に使用する温度範囲で密度を実測し、その変化量から算出する方法、(3)JIS K2249 の容量換算基本式などで 15 ℃の密度計測値から推定する方法などがある。本ガイドでは、(1)の文献値を使用する場合について取り扱う。

●試験流体の圧力による圧縮係数の推定

試験流体の圧縮係数は、文献値を利用する。または、ISO9770-1989 付属書 A に記載されている式を使って算出する。

$$\beta_L = 0.001 \times \exp\left(-1.6208 + 0.00021592T + \frac{0.87096}{\left(\rho_{15}/1000\right)^2} + \frac{0.0042092T}{\left(\rho_{15}/1000\right)^2}\right) \tag{2.15}$$

ここで、 ρ_{15} : 15 ℃での試験流体の密度 (kg/m^3)

●被校正流量計を校正する条件での標準流量計 K ファクタの推定

標準流量計の K ファクタは、上位標準（特定二次標準器の場合には特定標準器）により校正されているが、上位標準による校正時の条件（流量、温度、粘度）は、必ずしも被校正流量計の校正に使用する際の条件と一致しているわけではない。可能な場合には、標準流量計の校正証明書の条件と、被校正流量計の校正条

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

件が異なることによる標準流量計の K ファクタの変化を補正する。補正しない場合には、不確かさ解析において考慮する必要がある。

ここでは、標準流量計が、特定二次標準器である容積流量計であり、その K ファクタに以下の特性があることを前提とした。

・温度の変化による流量計ケーシングの熱膨張による影響が、材料の線膨張係数から補正可能

・流量計ケーシングの熱膨張補正を行った後の基準温度における K ファクタが、異なる粘度、密度、流量においても管レイノルズ数によって補正可能（管レイノルズ数で整理すると、K ファクタが一意に決まる特性を有する。）

校正証明書に記載されているＫファクタと校正温度を用いて基準温度（ここでは 20 ℃）のＫファクタに次式により補正する。

$$K_{f20,Cal} = K_{f,Cal}\left\{1 - 3\alpha_{FM}(20 - T_{Cal})\right\} \tag{2.16}$$

ここで、 $K_{f20,Cal}$: 基準温度20 ℃でのKファクタ (Pulse/L)

$K_{f,Cal}$: 校正証明書に記載されている条件でのKファクタ (Pulse/L)

α_{FM} : 流量計のケーシング材料の線膨張係数 (/℃)

T_{Cal} : 校正証明書に記載されている校正時の試験流体温度 (℃)

図 2.2、図 2.3 および図 2.4 に補正の参考例を示す。

ここでの管レイノルズ数は流量、動粘度、配管内径により次のように定めた。

$$\mathrm{Re} = \frac{4q_{ST}}{\pi \upsilon D} \tag{2.17}$$

ここで、 Re : 管レイノルズ数

π : 円周率

υ : 動粘度(m^2/s)

D : 流量計の配管内径[呼び径] (m)

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

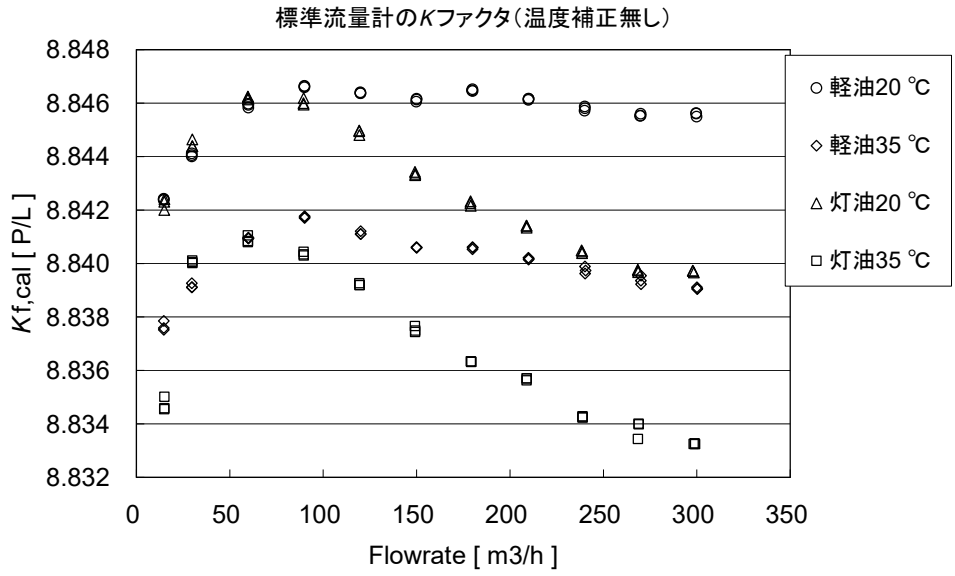


図 2.2 温度によるケーシングの熱膨張補正を行う前の K ファクタ

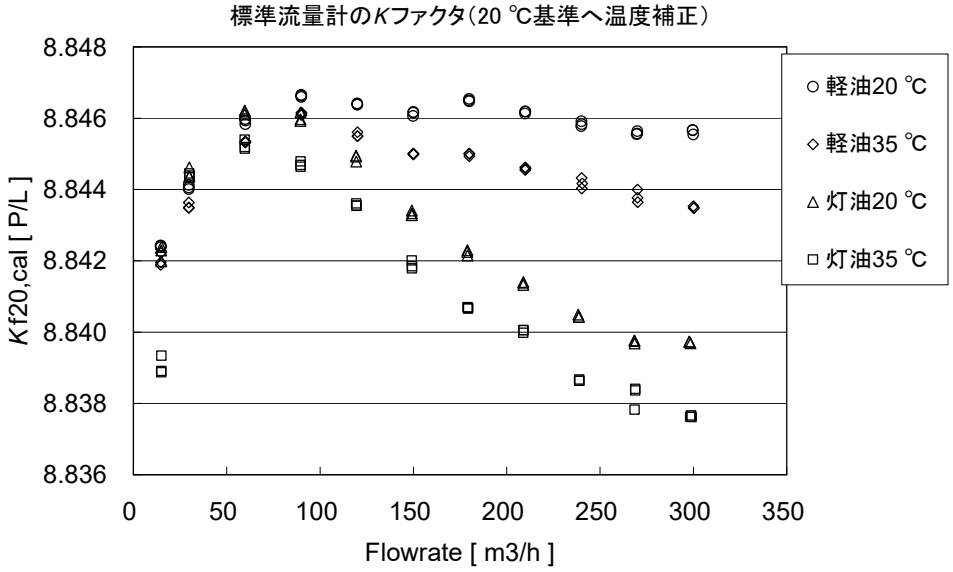


図 2.3 温度によるケーシングの熱膨張を補正した後の K ファクタ

温度によるケーシングの熱膨張補正後の K ファクタについて、管レイノルズ数を横軸にとり、グラフにすると図 2.4 のようになった。この流量計の場合には、一部の領域において、粘度、流量、密度の異なる条件であるが、同一管レイノルズ数では、ほぼ同一の K ファクタを示す特性があることが分かる。特性の良好な部分を選択して、管レイノルズ数を変数とするKファクタの適合曲線の近似関数を最小二乗法により定義した。ただし、低流量（低回転数）領域では、管レイノルズ数に対する特性が失われており、特性関数が適用できないことに注意しなければならない。1 本の特性関数では近似できない場合は、レイノルズ数により領域を分けて、異なる近似関数を定義することもできる。ここでは例として次のような近似関数となった。流量計により

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

適した近似関数の関数形状は異なる。

$$K_{f20,fit} = f_K(\mathrm{Re}) = A \times \mathrm{Re} + B \qquad (2.18)$$

ここで、 $K_{f20,fit}$: 管レイノルズ数に対する近似関数から得られる20 ℃基準のKファクタ (Pulse/L)
A, B : 近似関数の係数

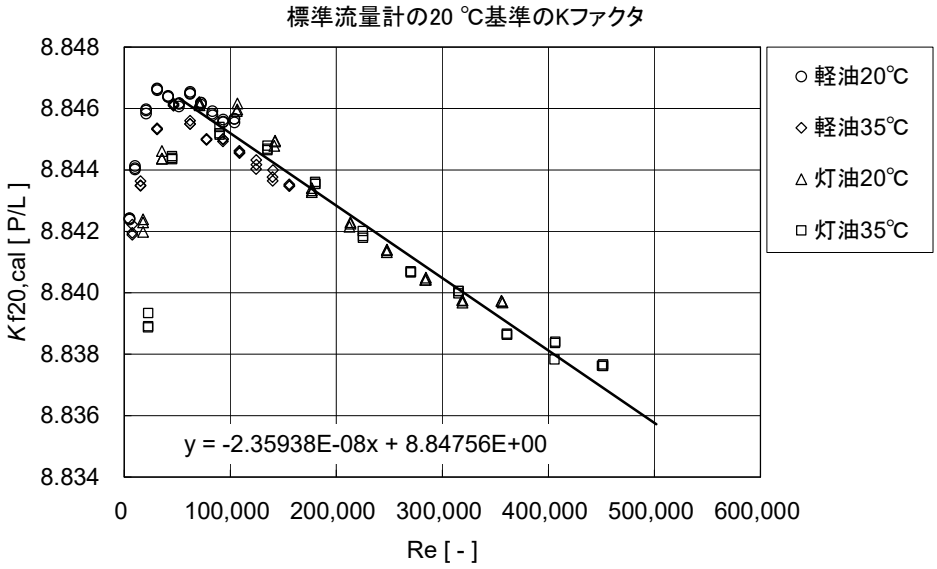


図 2.4 K ファクタの管レイノルズ数に対する特性

標準流量計の K ファクタは、次のようにして得られる。まず、式(2.18)のような近似関数に、その条件での管レイノルズ数を代入することで 20 ℃基準の K ファクタが得られる。さらに、その条件の温度に合わせてケーシングの熱膨張補正を行うことで被校正流量計を校正する条件での K ファクタが得られる。補正式は次のような式になる。

$$K_{fST} = K_{f20,fit}\left\{1 - 3\alpha_{FM}(T_{ST} - 20)\right\} \qquad (2.19)$$

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

2.3 不確かさ解析事例

本章では、これまで述べてきた石油用流量計の校正の不確かさ解析について述べるものとする。なお、不確かさ解析の評価事例にあたっての校正条件を、常用的な範囲として、試験流体温度 0 °C～40 °C、配管内圧力（ゲージ圧）0.1 MPa～0.8 MPa とする。また、流量計の校正の前提条件、または試験を行うにあたって満たしているべき条件を以下に示す。

・試験液は気体や液体が混合していない単相流であること。

・標準流量計と被試験流量計の間には、試験液の流入や漏出、配管内に気泡溜まりがないこと。

・流量変動は小さく、流量計のパルス出力は十分に追随しているものとすること。

・流量計のパルス出力は流量に比例して出力されており、パルス周波数に不均一性がないこと。

以上に関しては、これが成立しているものとして、これらの不確かさについては考えないものとする。

流量計の K ファクタの不確かさは次式で評価される。

$$\left\{\frac{u\left(K_{fTM}\right)}{K_{fTM}}\right\}^2 = u\left(\overline{\rho_{TM}}/\overline{\rho_{ST}}\right)^2 + \left\{\frac{u\left(I_{pTM}\right)}{I_{pTM}}\right\}^2 + \left\{\frac{u\left(I_{pST}\right)}{I_{pST}}\right\}^2 + u\left(\overline{t_{ST}}/\overline{t_{TM}}\right)^2 + \left\{\frac{u\left(K_{fST}\right)}{K_{fST}}\right\}^2 + \left\{\frac{u\left(\Delta M_{LDV}\right)}{\overline{\rho_{ST}}\,\overline{q_{ST}}\,t_D}\right\}^2 + \left\{\frac{u\left(\delta K_{fTM}\right)}{K_{fTM}}\right\}^2 \tag{2.20}$$

ここで、各要素は $u\left(\overline{\rho_{TM}}/\overline{\rho_{ST}}\right)$：密度比の不確かさ

$\dfrac{u\left(I_{pTM}\right)}{I_{pTM}}$：被校正流量計のパルス数の不確かさ

$\dfrac{u\left(I_{pST}\right)}{I_{pST}}$：標準流量計のパルス数の不確かさ

$u\left(\overline{t_{ST}}/\overline{t_{TM}}\right)$：標準流量計と被校正流量計のパルス計数時間の比の不確かさ

$\dfrac{u\left(K_{fST}\right)}{K_{fST}}$：標準流量計の使用条件における$K$ファクタの不確かさ

$\dfrac{u\left(\Delta M_{LDV}\right)}{\overline{\rho_{ST}}\,\overline{q_{ST}}\,t_D}$：接続管路内流体の質量変化による不確かさ

$\dfrac{u\left(\delta K_{fTM}\right)}{K_{fTM}}$：被校正流量計の校正値（$K$ファクタ）の偶然効果

各不確かさ要因はそれぞれ右辺第一項より、密度比の不確かさ、被校正流量計のパルス数の不確かさ、標準流量計のパルス数の不確かさ、標準流量計と被校正流量計のパルス計数時間の比の不確かさ、標準流量計の使用条件における K ファクタの不確かさ、接続管路内の流体質量変化による不確かさ、被校正流量計の校正値の偶然効果である。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

A. 密度比の不確かさ

式(2.14)により補正する場合には、密度比の不確かさは次式に展開することが出来る。

$$u\left(\overline{\rho_{TM}}/\overline{\rho_{ST}}\right)^2 \approx \left(\overline{T_{TM}}-\overline{T_{ST}}\right)^2 \cdot u\left(\alpha_L\right)^2 + {\alpha_L}^2 \cdot u\left(\overline{T_{TM}}-\overline{T_{ST}}\right)^2 + \left(\overline{p_{TM}}-\overline{p_{ST}}\right)^2 u\left(\beta_L\right)^2 + {\beta_L}^2 \cdot u\left(\overline{p_{TM}}-\overline{p_{ST}}\right)^2 \quad (2.21)$$

各不確かさの要因はそれぞれ右辺第一項より、試験液熱膨張係数による不確かさ、温度差の計測による不確かさ、圧縮係数による不確かさ、圧力差の計測による不確かさである。

ここでは、試験液の物性値について灯油を例として不確かさを推定する。

(A-1) 試験液熱膨張係数による不確かさ

熱膨張係数の不確かさと、生じうる温度差についての評価を行う。

試験液の熱膨張係数は文献値を利用するが、熱膨張係数についての不確かさを文献から得ることができない場合がある。ここでは大きくとも 10 %程度の不確かさであると仮定して、相対標準不確かさは次式で推定する。

$$\frac{u\left(\alpha_L\right)}{\alpha_L} = 0.10 \quad (2.22)$$

ここでは灯油の熱膨張係数を文献値から 9.0×10^{-4} (/℃) する。文献から不確かさを得ることができないため、熱膨張係数の標準不確かさは次式と推定した。

$$u\left(\alpha_L\right) = 9\times10^{-5} \quad (/℃) \quad (2.23)$$

被校正流量計と標準流量計の温度差は、校正試験中に生じうる温度差のもっとも大きい温度差として、(または、試験中に許される温度差の管理限界の温度差として)、ここでは 0.50 ℃と仮定する。

$$\left(\overline{T_{TM}}-\overline{T_{ST}}\right) = 0.50 \quad (℃) \quad (2.24)$$

(A-2) 温度差の計測による不確かさ

熱膨張係数の代表値と、温度差の計測の不確かさの評価を行う。

温度差の計測においては、被校正流量計内の温度推定値と標準流量計内の温度推定値の相関係数 $r\left(\overline{T_{TM}},\overline{T_{ST}}\right)$ が 0～1 の間にあることが推定されるが、ここでは相関が強くないものが主であるとして、相関係数を 0 とする。

$$u\left(\overline{T_{TM}}-\overline{T_{ST}}\right)^2 = u\left(\overline{T_{TM}}\right)^2 + u\left(\overline{T_{ST}}\right)^2 - 2r\left(\overline{T_{TM}},\overline{T_{ST}}\right)u\left(\overline{T_{TM}}\right)u\left(\overline{T_{ST}}\right) = u\left(\overline{T_{TM}}\right)^2 + u\left(\overline{T_{ST}}\right)^2 \quad (2.25)$$

流量計内の温度計測値(計測時間中の平均値)の不確かさは主要な要因から次式として表す。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

$$u\left(\overline{T_{TM}}\right)^2 = u\left(T_{TMm}\right)^2 + u\left(T_{COR}\right)^2 + u\left(T_{RPR}\right)^2 + u\left(T_{TMC}\right)^2 + u\left(\Delta T_{TM}\right)^2 + u\left(\delta T_{TM}\right)^2 \quad (2.26)$$

$$u\left(\overline{T_{ST}}\right)^2 = u\left(T_{STm}\right)^2 + u\left(T_{COR}\right)^2 + u\left(T_{RPR}\right)^2 + u\left(T_{STC}\right)^2 + u\left(\Delta T_{ST}\right)^2 + u\left(\delta T_{ST}\right)^2 \quad (2.27)$$

ここで、 $u\left(T_{TMm}\right), u\left(T_{STm}\right)$：温度計の分解能の不確かさ（℃）

$u\left(T_{COR}\right)$：温度計の調整の不完全性による不確かさ（℃）

$u\left(T_{RPR}\right)$：温度計の校正周期間の経年変化（再現性）の不確かさ（℃）

$u\left(T_{TMC}\right), u\left(T_{STC}\right)$：温度計の校正の不確かさ（℃）

$u\left(\Delta T_{TM}\right), u\left(\Delta T_{ST}\right)$：温度計設置位置と流量計内試験液の温度差（℃）

$u\left(\delta T_{TM}\right), u\left(\delta T_{ST}\right)$：温度変動と測定サンプリング周期に起因する不確かさ（℃）

ここでは、温度計の分解能は 0.01 ℃とする。

温度計は定期的に調整および校正が実施されるが、標準温度と温度計の指示値の偏差を完全になくすことはできず、調整の不完全性が残るものとする。調整の管理幅として、標準温度と温度計の指示値の最大偏差（補正値）が 0.03 ℃以下となるように管理されているものとする。

また、温度計を調整する前に校正し、校正周期間での校正値の変化を比較したところ、最大で 0.10 ℃のドリフトを生じたものが存在したと仮定し、これを温度計の経年変化の最大値として評価する。

温度計は標準温度計により、恒温槽などを使って校正されるものとする。その校正値の不確かさは標準不確かさで 0.02 ℃であったとする。これには標準温度計の校正証明書に記載された不確かさ、標準温度計の経年変化および指示値の不確かさ、恒温槽の安定性、温度分布の不確かさなどが含まれているとする。

実験的に流量計位置に設置された温度計と校正時に使用する温度計との温度差を調べたところ最大で 0.20 ℃であった。

試験液の温度は試験中の測定値の平均を用いるが、単調上昇と周期的な変化が重なりあった試験液の温度変動が確認されたとする。ここでは計測時間と温度測定のサンプリング周期の関係から最小サンプリング数は 5 回程度の場合があり十分に多くない場合を検討する。試験液の変動について複数周期を含む長時間の実験的な測定を実施した結果、温度変動の標準偏差は 0.11 ℃であった。温度計の保護管径は細く、保護管による温度測定の遅れの影響は十分に小さいとして無視した。ここでは実験的に得られた代表的な試験液の温度変動の標準偏差を最小のサンプリング回数の平方根で割ることで、温度測定値の平均の実験標準偏差を算出し、試験液の温度変動と測定サンプリング周期に起因する標準不確かさとして推定した。仮に十分な測定のサンプリング回数があれば、この不確かさは無視し得る。

以上のことから流量計内の温度計測値の合成標準不確かさは次の表のように示すことが出来る。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

表 2.1　温度計測定値の不確かさ

要因	記号	入力	除数	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 c_i	全体の不確かさに対する寄与 $[c_i \cdot u(x_i)]^2 \times 10^{-2}$
温度計の分解能	T_{TMm}, T_{STm}	0.01　℃	$2\sqrt{3}$	0.003　℃	1	0.00
温度計の調整の不完全性	T_{COR}	0.03　℃	$\sqrt{3}$	0.017　℃	1	0.03
温度計の経年変化	T_{RPR}	0.10　℃	$\sqrt{3}$	0.058　℃	1	0.33
温度計の校正値の不確かさ	T_{TMC}, T_{STC}	0.02　℃	1	0.020　℃	1	0.04
温度計位置と流量計内の温度差	$\Delta T_{TM}, \Delta T_{ST}$	0.20　℃	$\sqrt{3}$	0.115　℃	1	1.32
試験液の温度変動と測定サンプリング周期	$\delta T_{TM}, \delta T_{ST}$	0.11　℃	$\sqrt{5}$	0.049　℃	1	0.24
合成標準不確かさ				0.14　℃		1.96

したがって、温度差の計測値の不確かさは次式のように評価される。

$$u\left(\overline{T_{TM}} - \overline{T_{ST}}\right) = \sqrt{u\left(\overline{T_{TM}}\right)^2 + u\left(\overline{T_{ST}}\right)^2} = \sqrt{0.14^2 + 0.14^2} = 0.20 \quad (℃) \tag{2.28}$$

(A-3) 試験液圧縮係数による不確かさ

圧縮係数の不確かさと、生じうる圧力差についての評価を行う。

試験液の圧縮係数は文献値を利用するが、圧縮係数についての不確かさを文献から得ることができない場合がある。ここでは大きくとも 10 %程度の不確かさであると仮定して、相対標準不確かさは次式で推定する。

$$\frac{u(\beta_L)}{\beta_L} = 0.10 \tag{2.29}$$

ここでは灯油の圧縮係数を文献値から 9.0×10^{-4} (/MPa)とする。文献から不確かさを得ることができないため、圧縮係数の標準不確かさは次式と推定した。

$$u(\beta_L) = 9 \times 10^{-5} \quad (/\mathrm{MPa}) \tag{2.30}$$

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

被校正流量計と標準流量計の圧力差は、校正試験中に生じうる圧力差のもっとも大きい圧力差として、ここでは 0.20 MPa と仮定する。

$$\left(\overline{p_{TM}}-\overline{p_{ST}}\right)=0.20 \quad \text{(MPa)} \tag{2.31}$$

(A-4) 圧力差の計測による不確かさ

圧縮係数の代表値と、圧力差の計測の不確かさの評価を行う。

圧力差の計測においては、被校正流量計内の圧力推定値と標準流量計内の圧力推定値の相関係数 $r\left(\overline{p_{TM}},\overline{p_{ST}}\right)$ が 0～1 の間にあることが推定されるが、ここでは相関が強くないものが主であるとして、相関係数を 0 とする。

$$\begin{aligned} u\left(\overline{p_{TM}}-\overline{p_{ST}}\right)^2 &= u\left(\overline{p_{TM}}\right)^2+u\left(\overline{p_{ST}}\right)^2-2r\left(\overline{p_{TM}},\overline{p_{ST}}\right)u\left(\overline{p_{TM}}\right)u\left(\overline{p_{ST}}\right) \\ &= u\left(\overline{p_{TM}}\right)^2+u\left(\overline{p_{ST}}\right)^2 \end{aligned} \tag{2.32}$$

流量計内の圧力計測値（計測時間中の平均値）の不確かさは主要な要因から次式として表す。

$$u\left(\overline{p_{TM}}\right)^2=u\left(p_{TMm}\right)^2+u\left(p_{COR}\right)^2+u\left(p_{RPR}\right)^2+u\left(p_{TMC}\right)^2+u\left(\Delta p_{TM}\right)^2 \tag{2.33}$$

$$u\left(\overline{p_{ST}}\right)^2=u\left(p_{STm}\right)^2+u\left(p_{COR}\right)^2+u\left(p_{RPR}\right)^2+u\left(p_{STC}\right)^2+u\left(\Delta p_{ST}\right)^2 \tag{2.34}$$

ここで、 $u\left(p_{TMm}\right),u\left(p_{STm}\right)$：圧力計の分解能の不確かさ (MPa)

$u\left(p_{COR}\right)$：圧力計の調整の不完全性による不確かさ (MPa)

$u\left(p_{RPR}\right)$：圧力計の校正周期間の経年変化（再現性）の不確かさ (MPa)

$u\left(p_{TMC}\right),u\left(p_{STC}\right)$：圧力計の校正の不確かさ (MPa)

$u\left(\Delta p_{TM}\right),u\left(\Delta p_{ST}\right)$：圧力計設置位置と流量計内試験液の圧力差 (MPa)

ここでは、圧力計の分解能は 0.001 MPa とする。

圧力計は定期的に調整および校正が実施されるが、標準圧力と圧力計の指示値の偏差を完全になくすことはできず、調整の不完全性が残るものとする。調整の管理幅として、標準圧力と圧力計の指示値の最大偏差（補正値）が 0.003 MPa 以下となるように管理されているものとする。

また、圧力計を調整する前に校正し、校正周期間での校正値の変化を比較したところ、最大で 0.005 MPa のドリフトを生じたものが存在したと仮定し、これを圧力計の経年変化の最大値として評価する。

圧力計は標準圧力計により校正されるものとする。その校正値の不確かさは標準不確かさで 0.001 MPa であったとする。これには標準圧力計の校正証明書に記載された不確かさ、標準圧力計の経年変化および指示値の不確かさ、校正時の圧力の安定性、ヘッド圧の補正の不確かさなどが含まれているとする。

圧力計位置と流量計内の圧力差は、流量計の圧力損失の最大値を 0.050 MPa と仮定して、この範囲内であるとした。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

試験中の圧力変動は非常に小さいことから、圧力変動と測定サンプリング周期に起因する不確かさは無視した。

以上のことから流量計内の圧力計測値の合成標準不確かさは次の表のように示すことが出来る。

表 2.2　圧力差の計測による不確かさ

要因	記号	入力	除数	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 c_i	全体の不確かさに対する寄与 $[c_i \cdot u(x_i)]^2 \times 10^{-4}$
圧力計の分解能	p_{TMm}, p_{STm}	0.001 MPa	$2\sqrt{3}$	0.0003 MPa	1	0.00
圧力計の調整の不完全性	p_{COR}	0.003 MPa	$\sqrt{3}$	0.0017 MPa	1	0.03
圧力計の経年変化	p_{RPR}	0.005 MPa	$\sqrt{3}$	0.0029 MPa	1	0.08
圧力計の校正値の不確かさ	p_{TMC}, p_{STC}	0.001 MPa	1	0.0010 MPa	1	0.01
圧力計位置と流量計内の圧力差	$\Delta p_{TM}, \Delta p_{ST}$	0.050 MPa	$\sqrt{3}$	0.0289 MPa	1	8.35
合成標準不確かさ				0.029 MPa		8.47

したがって、圧力差の計測値の不確かさは次式のように評価される。

$$u\left(\overline{p_{TM}} - \overline{p_{ST}}\right) = \sqrt{u\left(\overline{p_{TM}}\right)^2 + u\left(\overline{p_{ST}}\right)^2} = \sqrt{0.029^2 + 0.029^2} = 0.041 \quad (\mathrm{MPa}) \tag{2.35}$$

以上のことから密度比の不確かさは灯油と仮定すると次のように評価される。

表 2.3　密度比の不確かさ

要因	記号	入力	除数	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 c_i	全体の不確かさに対する寄与 $[c_i \cdot u(x_i)]^2 \times 10^{-8}$
試験液熱膨張係数	α_L	9×10^{-5} /℃	1	9×10^{-5} /℃	0.50 ℃	0.20
温度差の計測値	$\overline{T_{TM}} - \overline{T_{ST}}$	0.20 ℃	1	0.20 ℃	9.0×10^{-4} /℃	3.24

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

試験液の圧縮係数	β_L	9×10^{-5} /MPa	1	9×10^{-5} /MPa	0.20 MPa	0.03
圧力差の計測値	$\overline{p_{TM}}-\overline{p_{ST}}$	0.04 MPa	1	0.04 MPa	9.0×10^{-4} /MPa	0.13
相対合成標準不確かさ				1.9×10^{-4}		3.60

B. パルス数および時間の不確かさ

ゲート信号に対して、二重計時法を使っているものとし、パルスの数え落としは無いものとすると、パルス計数の不確かさは無視する。

標準流量計と被校正流量計のパルス計数時間の比の不確かさは、次のように仮定する。タイマーの偶然誤差は非常に小さく、時間分解能も十分に小さく、時間計測の不確かさの主要因は水晶発振子の安定性とする。さらに同じ水晶発振子に同期したタイマーによってそれぞれのパルス計数時間の計測を行ったとすると、非常に相関の強い計測を行ったことになる。相関係数 $r\left(\overline{t_{ST}},\overline{t_{TM}}\right)=1$ とすると、次式に書き直すことが出来る。

$$\begin{aligned} u\left(\overline{t_{ST}}/\overline{t_{TM}}\right)^2 &= u\left(\overline{t_{ST}}\right)^2+u\left(\overline{t_{TM}}\right)^2-2r\left(\overline{t_{ST}},\overline{t_{TM}}\right)u\left(\overline{t_{ST}}\right)u\left(\overline{t_{TM}}\right) \\ &= \left(u\left(\overline{t_{TM}}\right)-u\left(\overline{t_{ST}}\right)\right)^2 \end{aligned} \tag{2.36}$$

このように打ち消しあうために、時間計測の不確かさは他の不確かさ要因に対して十分に小さく、これを無視することができるとする。

C. 標準流量計の使用条件におけるＫファクタの不確かさ

標準流量計は定期的に校正されているものとする。標準流量計の使用条件におけるＫファクタの不確かさは次式で評価される。

$$\begin{aligned} \left\{\frac{u\left(K_{fST}\right)}{K_{fST}}\right\}^2 &= \left\{\frac{u\left(f_k(\mathrm{Re})\right)}{K_{fST}}\right\}^2+\left(3\alpha_{FM}\right)^2\cdot u\left(T_{ST}\right)^2+\left(T_{ST}-20\right)^2\cdot u\left(3\alpha_{FM}\right)^2 \\ &\quad+\left\{\frac{u\left(K_{f-RPR}\right)}{K_{fST}}\right\}^2+\left\{\frac{u\left(\delta K_{f-p}\right)}{K_{fST}}\right\}^2 \end{aligned} \tag{2.37}$$

ここで、 $u\left(f_k(\mathrm{Re})\right)$: 管Re数による$K$ファクタの近似関数の不確かさ

$u\left(\delta K_{f-p}\right)$: Kファクタの圧力影響による不確かさ

$u\left(K_{f-RPR}\right)$: Kファクタの校正周期間の経年変化（再現性）

各不確かさ要因はそれぞれ右辺第一項より、近似関数の不確かさ、被校正流量計を校正する条件での標準流量計の温度による不確かさ、流量計ケーシングの熱膨張係数による不確かさ、Ｋファクタの校正周期間

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

の経年変化（再現性）による不確かさ、被校正流量計を校正する条件での標準流量計の圧力と標準流量計が校正された際（校正証明書）の圧力とが異なることによる不確かさである。

(C-1) 管レイノルズ数による K ファクタの近似関数の不確かさ

近似関数の不確かさには、校正証明書に記載されている校正値の不確かさ、近似にともなう不確かさ、校正証明書の校正値を 20 ℃基準へ温度補正した際の補正の不確かさ、管レイノルズ数(Re 数)の推定の不確かさによる算出Ｋファクタのずれの不確かさがあると評価される。標準流量計の校正証明書に記載されている校正値の相対標準不確かさは 1.5×10^{-4} とする。図 2.5 に適合曲線への近似に使用されたデータの近似関数（図 2.4 中の式）からの残差を示す。ここでは近似関数を決定する際に、最大残差が相対値で 1.3×10^{-4} であった。この Re 数条件で試験が実施された場合には、常にこの残差分が誤差として影響を与えることから、近似にともなう不確かさはこの最大値を相対標準不確かさとして、1.3×10^{-4} と評価される。校正証明書の校正値を 20 ℃基準のＫファクタに補正しているが、異なる温度のデータは良好に一つの近似関数に一致しており、ここでの温度補正の不確かさは残差に含まれていると考えられる。動粘度算出の不確かさや流量値の算出の不確かさによる管レイノルズ数の不確かさにより、K ファクタのずれが考えられるが、近似関数の傾きと管レイノルズ数の不確かさから評価することができる。ここでは、最大管レイノルズ数付近(Re=450000)で 1.0×10^{-1} 程度の管レイノルズ数の相対標準不確かさがあるとする。K ファクタの相対値の傾きは-2.7×10^{-9}(/Re)であった。以上のことから、近似関数の相対標準不確かさは次式で評価される。

$$\begin{aligned}\frac{u\left(f_k(\mathrm{Re})\right)}{K_{fST}} &= \sqrt{\left\{\frac{u\left(K_{f,Cal}\right)}{K_{f,Cal}}\right\}^2+\left\{\frac{MAX\left(\left|K_{f20,Cal}-K_{f20,fit}\right|\right)}{K_{fST}}\right\}^2+\left\{\frac{\partial f_k(\mathrm{Re})}{\partial \mathrm{Re}}\frac{u(\mathrm{Re})}{K_{fST}}\right\}^2} \\ &= \sqrt{(1.5\times10^{-4})^2+(1.3\times10^{-4})^2+\left(-2.7\times10^{-9}\times450000\times1.0\times10^{-1}\right)^2} \\ &= \sqrt{(1.5\times10^{-4})^2+(1.3\times10^{-4})^2+(-1.2\times10^{-4})^2} \\ &= 2.3\times10^{-4}\end{aligned} \tag{2.38}$$

注）運用上の利便性から、残差に伴う不確かさを、管理限界の設定から評価することも可能。仮に相対偏差の管理限界を$\pm3.0\times10^{-4}$と設定すると、矩形分布として、相対標準不確かさは 1.7×10^{-4}となる。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

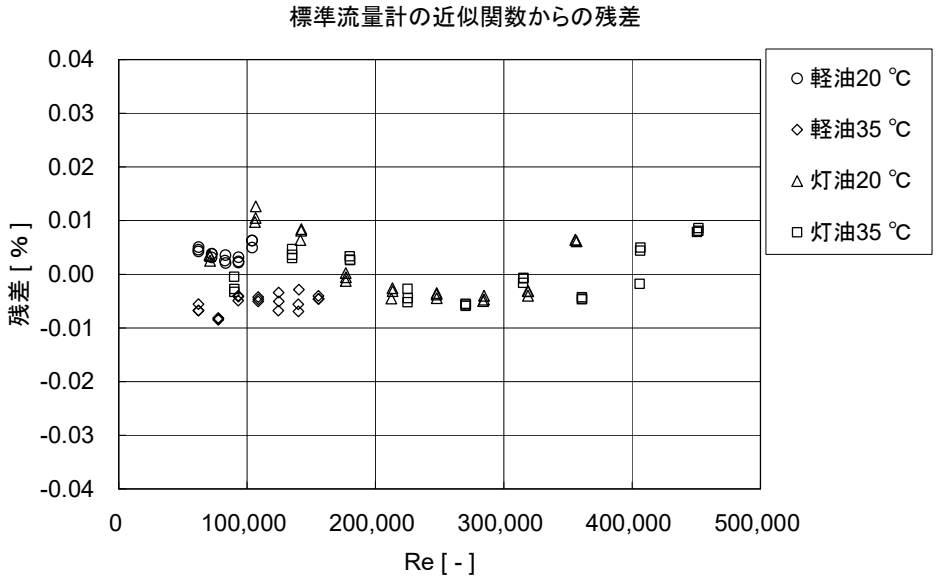


図 2.5　K ファクタの近似関数からの残差

(C-2) 標準流量計のケーシングの熱膨張補正に伴う不確かさ

標準流量計のケーシングの熱膨張係数は流量計材料の線膨張係数の 3 倍の値が使われ、ここでは、文献値より 3.3×10^{-5} (/℃)とする。また、標準流量計での温度計測の不確かさは上記(A-2)より 0.14 ℃とする。したがって、標準流量計のケーシングの熱膨張補正に伴う相対標準不確かさは次式で評価され、ほぼ無視できることがわかる。

$$\begin{aligned}\left(3\alpha_{FM}\right)\cdot u\left(T_{ST}\right) &= 3.3\times10^{-5}\times0.14 \\ &\approx 0.0\times10^{-4}\end{aligned} \tag{2.39}$$

ケーシングの熱膨張係数の不確かさは、上述のとおり、近似関数への温度補正が良好であったことから、この標準流量計にあっては材料の線膨張係数から良好に推定可能であったと言える。材料の線膨張係数の文献値の不確かさを文献より得られない場合には、大きくとも 1.0×10^{-1} 程度の相対標準不確かさであると仮定する。したがって次式のような評価とする。標準流量計の温度と基準温度 20 ℃との最大差は試験流体温度 0 ℃～40 ℃ の前提条件から最大で 20 ℃とする。

$$\begin{aligned}\left(T_{ST}-20\right)\cdot u\left(3\alpha_{FM}\right) &= 20\times3.3\times10^{-6} \\ &\approx 0.7\times10^{-4}\end{aligned} \tag{2.40}$$

(C-3) 標準流量計の経年変化（再現性）に伴う不確かさ

標準流量計の校正周期間での校正値の比較をしたところ、K ファクタの相対偏差として最大で 3.0×10^{-4} のドリフトを持つデータがあったと仮定する。

(C-4) 標準流量計の K ファクタの圧力影響による不確かさ

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

被校正流量計を校正する条件での標準流量計の圧力と標準流量計が校正された際(校正証明書)の圧力とが異なることによる不確かさは、標準流量計の校正時の圧力を変化させて校正することで特性評価を行ったところ、十分に小さいことが確認されたため、ここでは無視する。

以上のことから標準流量計の使用条件(被校正流量計校正時)の K ファクタの合成標準不確かさは次の表のように示すことが出来る。

表 2.4 標準流量計の K ファクタの不確かさ

要因		記号	入力	除数	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 c_i	全体の不確かさに対する寄与 $[c_i \cdot u(x_i)]^2 \times 10^{-8}$
近似関数	校正証明書	$K_{f,Cal}$	1.5×10^{-4} –	1	1.5×10^{-4} –	1	2.25
	残差	$K_{f20,Cal} - K_{f20,fit}$	1.3×10^{-4} –	1	1.3×10^{-4} –	1	1.69
	管 Re 数	Re	45000 –	1	45000 –	-2.7×10^{-9}	1.48
温度補正	温度測定	T_{ST}	0.14 ℃	1	0.0×10^{-4} ℃	3.3×10^{-5}	0.00
	熱膨張係数	$3\alpha_{FM}$	3.3×10^{-6} /℃	1	3.3×10^{-6} /℃	20	0.44
標準流量計の経年変化		K_{f-RPR}	3.0×10^{-4} –	$\sqrt{3}$	1.73×10^{-4} –	1	3.00
標準流量計への圧力影響		K_{f-p}	0.0 –	1	0.0×10^{-4} –	0.0×10^{-4}	0.00
合成相対標準不確かさ					3.0×10^{-4}		8.86

D. 接続管路内流体の質量変化による不確かさ

圧力および温度変化に伴う接続管路の配管体積の変化量は、試験液の密度変化に比べて十分に小さいことから無視する。また、一定流量で試験されることから試験開始時と終了時の圧力変化量は十分に小さい考えられるため、これを無視する。したがって接続管路内での試験開始時から終了時までの質量変化量は次式で表される。

$$\Delta M_{LDV} \approx \rho_{DV}\alpha_L \Delta T_{DV} V_{DV} \qquad (2.41)$$

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

したがって、接続管路内の質量変化による不確かさは次式で評価される。

$$\frac{u\left(\Delta M_{LDV}\right)}{\overline{\rho_{ST}}\,\overline{q_{ST}}\,t_D} \approx \frac{\rho_{DV}\alpha_L \Delta T_{DV} V_{DV}}{\overline{\rho_{ST}}\,\overline{q_{ST}}\,t_D} \approx \frac{V_{DV}}{\overline{q_{ST}}\,t_D}\alpha_L \Delta T_{DV} \tag{2.42}$$

接続管路の体積量と校正試験時の積算通液体積量の比は試験条件により異なるが、ここでは、1:1 程度であったと仮定する。試験開始時と終了時の温度変化量は最大で 0.30 ℃以内となるように試験条件が管理されているとすると、接続管路内試験液の質量変化による相対標準不確かさは次式と評価される。

$$\frac{u\left(\Delta M_{LDV}\right)}{\overline{\rho_{ST}}\,\overline{q_{ST}}\,t_D} \approx \alpha_L \Delta T_{DV} = 9.0\times10^{-4} \times \frac{0.30}{\sqrt{3}} \approx 1.6\times10^{-4} \tag{2.43}$$

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

E. 合成標準不確かさ

以上の評価事例に基づき算出された不確かさから、被校正流量計の校正値の偶然効果の不確かさを除いた、校正の不確かさのバジェットシートは次のようになる。

表 2.5 合成標準不確かさ

要因	記号	標準 不確かさ $u(x_i)$	感度 係数 c_i	全体の不確かさに 対する寄与 $[c_i \cdot u(x_i)]^2$ $\times 10^{-8}$
密度比	$\overline{\rho_{TM}}/\overline{\rho_{ST}}$	1.9×10^{-4}	1	3.61
パルス計数	I_{pTM}, I_{pST}	0	1	0.00
パルス計数時間	t_{pTM}, t_{pST}	0	1	0.00
標準流量計の K ファクタ	K_{fST}	3.0×10^{-4}	1	9.00
接続管路内流体の質量変化	ΔM_{LDV}	1.6×10^{-4}	1	2.56
合成相対標準不確かさ		3.9×10^{-4}		15.17

F. 被校正流量計の校正値の偶然効果の不確かさ

被校正流量計の校正値はマスターメータ法によりn回繰返し測定し、その平均値により求めることとすると、偶然効果による不確かさは、平均値の標準偏差として次式で評価される。

$$\frac{u\left(\delta\overline{K_{fTM}}\right)}{\overline{K_{fTM}}} = \frac{\sigma\left(\overline{K_{fTM}}\right)}{\overline{K_{fTM}}\sqrt{n}} \tag{2.44}$$

被校正流量計の繰り返し校正試験を実施した結果、偶然効果による不確かさとして平均値の標準偏差が 0.5×10^{-4} 以下となる結果を得た。

偶然効果と校正の不確かさとを二乗和することで、校正値の不確かさを算出する。以上のことから、繰り返し試験の結果得られた K ファクタの平均値の相対合成標準不確かさは次式で表される。

$$\begin{aligned}\frac{u_c\left(\overline{K_{fTM}}\right)}{\overline{K_{fTM}}} &= \sqrt{\left(\frac{u(K_{fTM})}{K_{fTM}}\right)^2 + \left(\frac{u\left(\delta\overline{K_{fTM}}\right)}{\overline{K_{fTM}}}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(3.9\times10^{-4}\right)^2 + \left(0.5\times10^{-4}\right)^2} \\ &= 3.9\times10^{-4}\end{aligned} \tag{2.45}$$

評価された相対合成標準不確かさに包含係数 k（通常は $k = 2$ ）を掛けることで相対拡張不確かさを算出

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

する。

$$\frac{U\left(\overline{K_{fTM}}\right)}{\overline{K_{fTM}}} = k \cdot \frac{u_c\left(\overline{K_{fTM}}\right)}{\overline{K_{fTM}}} = 2 \times 3.9 \times 10^{-4} = 7.8 \times 10^{-4} \quad (2.46)$$

表 2.6 校正・測定能力

校正対象	石油用流量計
拡張不確かさ（k = 2）	0.078 %

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

3. 有効自由度の取扱い事例

3. 1 はじめに

本評価事例では、JCSS 登録事業者が信頼の水準約 95 %に対応する区間で拡張不確かさの推定をする場合の有効自由度の取扱い方法を示す。

(注)この評価事例の適用は、JCSS 登録事業者が GUM 付属書 G に従って厳密に有効自由度を計算し、信頼の水準約 95 % に対応する区間の包含係数を決定することを妨げるものではない。

3. 2 拡張不確かさの決定方法

(1) 校正事業者は、自ら評価した校正装置の標準不確かさu_{f}と繰り返し回数Nと表 3.1 を使って、有効自由度ν_{eff}が 9 になるσ_9を予め求める。

(2) 実際の校正においてN回の繰り返しで得られた被校正流量計の校正結果の標準偏差σ_{r}と、上記のσ_9を比較する。

(3) $\sigma_{\mathrm{r}} \leq \sigma_9$ならば、$k$ = 2 を使用する。

(4) $\sigma_{\mathrm{r}} > \sigma_9$ならば、以下のいずれかを行う。

a) $\sigma_{\mathrm{r}} / u_{\mathrm{f}}$を求め、この値と繰り返し回数$N$をもとに表 3.2 から対応する包含係数$k$の値を求め、この値を用いて拡張不確かさを報告する。

b) k = 2 を使用したい場合は、表 3.2 をもとにその時の$\sigma_{\mathrm{r}} / u_{\mathrm{f}}$の値の行で k = 2 になるまで繰り返し回数Nを増やす。包含係数は k = 2 を使用する。

(参考) 被校正流量計の校正結果の標準偏差としてプールされた実験標準偏差(10 個以上の測定データ)を利用している場合や繰り返し測定のばらつきが校正事業者が定めた管理値以内であることを確認している場合は、有効自由度ν_{eff}が 9 以上となるため、包含係数は k = 2 を使用できる。

表 3.1 繰り返し回数Nに対する、有効自由度$\nu_{\mathrm{eff}} = 9$が得られる測定の標準偏差σ_9と校正装置の標準不確かさu_{f}の比

N	$\sigma_9 / u_{\mathrm{f}}$
3	1.6
4	2.3
5	3.2
6	4.2
7	5.6
8	7.7
9	12.2
10	∞

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

表 3.2 信頼の水準 95 %を与える包含係数(*k*)の値

σ_r/u_f	*N*						
	3	4	5	6	7	8	9
1.6以下							
1.8以下	2.3						
2.0以下	2.4						
2.2以下	2.5						
2.4以下	2.6	2.3					
2.6以下	2.7	2.3					
2.8以下	2.8	2.4					
3.0以下	2.9	2.4					
3.2以下	3.0	2.5					
3.4以下	3.1	2.5	2.3				
3.8以下	3.2	2.6	2.3				
4.0以下	3.3	2.6	2.4				
4.2以下	3.4	2.7	2.4				
4.4以下	3.4	2.7	2.4	2.3			
4.6以下	3.5	2.7	2.4	2.3			
4.9以下	3.5	2.8	2.5	2.3			
5.0以下	3.6	2.8	2.5	2.3			
5.5以下	3.7	2.8	2.5	2.4			
6.0以下	3.7	2.9	2.5	2.4	2.3		
6.4以下	3.8	2.9	2.6	2.4	2.3		
7.0以下	3.9	2.9	2.6	2.4	2.3		
7.5以下	3.9	3.0	2.6	2.4	2.3		
8.0以下	4.0	3.0	2.6	2.4	2.3	2.3	
8.7以下	4.0	3.0	2.6	2.5	2.4	2.3	
9.0以下	4.0	3.0	2.7	2.5	2.4	2.3	
9.5以下	4.1	3.0	2.7	2.5	2.4	2.3	
12以下	4.1	3.1	2.7	2.5	2.4	2.3	
20以下	4.2	3.1	2.7	2.5	2.4	2.3	2.3
20超	4.3	3.2	2.8	2.6	2.4	2.4	2.3

k = 2

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

3. 3 適用例

(1)適用例その 1

① 校正装置の標準不確かさu_f = 0.039%、繰り返し回数 N = 5 で校正を行う場合。

表 3.1 よりσ_9 / u_f = 3.2 が求められる。

したがって、$\sigma_9 = 3.2 \times 0.039\% = 0.1248\% \approx 0.12\%$

② 実際に校正を行い、校正値の標準偏差がσ_r=0.082%であったとする。

③ ①のσ_9と比較して、$\sigma_r \leq \sigma_9$ であるので、通常どおり k = 2 を使用して拡張不確かさを計算する。

(2)適用例その2

① 校正装置の標準不確かさと校正の繰り返し回数は、適用例その 1 と同様とする。

② 実際に校正を行い、校正値の標準偏差がσ_r= 0.32%であったとする。

③ 適用例 1 で求めた$\sigma_9 = 0.12\%$と比較して、$\sigma_r > \sigma_9$ であるので、3.2(4)のいずれかを実行する。

a)を選択した場合:

・計算により、σ_r / u_f = 0.32% / 0.039% = 8.21

・表 3.2 において、σ_r / u_f=8.21 に対応するのは「8.7 以下」の欄であるので、この行の繰り返し回数 N が「5」の列を見て、信頼の水準約 95%を与える包含係数は、k = 2.6 と求められる。

・k = 2.6 を用いて拡張不確かさを計算する。

b)を選択した場合:

・$\sigma_r \leq \sigma_9$ とするためには、$\sigma_9 / u_f \geq \sigma_r / u_f$=8.21 とすればよいので、表 3.1 を使用して繰り返し回数 N = 9（このときσ_9 / u_f = 12.2）が求められる。

・すでに得られている 5 回の繰り返し測定に加えて、4 回の追加測定を行う（あるいは新たに 9 回の繰り返し測定を行う）。

・9 回の繰り返し測定を行った結果、標準偏差がσ_{r2}= 0.40%であったとする。この値について、$\sigma_{r2} \leq \sigma_9$ が成立することを確認する。

① 表1から繰り返し回数 N = 9 の場合のσ_9 / u_f が 12.2 と求められる。

② 校正装置の標準不確かさu_f = 0.039%であるから、$\sigma_9 = 12.2 \times 0.039\% = 0.4758\% \approx 0.48\%$

③ したがって、$\sigma_{r2} \leq \sigma_9$

・k = 2 を用いて拡張不確かさを計算する。

3. 4 参考

(1) 仮定

表 3.1 および表 3.2 の計算には以下の仮定を用いている。

・校正装置の標準不確かさの自由度は無限大とする。

・有効自由度ν_{eff} が 9 以上なら、包含係数は k = 2 を使用する。

(2) 表 3.1 の計算

校正装置による標準不確かさと自由度をu_fとν_fで表し、DUT による標準不確かさと自由度をu_rとν_rで表す。

$$u_r = \frac{\sigma_r}{\sqrt{N}} \qquad (3.1)$$

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

ここで、σ_rとN は校正値の標準偏差と測定回数である。

$\nu_f = \infty$（校正装置の標準不確かさの自由度は無限大）と仮定すると、合成された標準不確かさの有効自由度は、下式で求められる。

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^{N} \frac{u_i^4}{\nu_i}} \tag{3.2}$$

$$\nu_{eff} = \frac{\left(u_f^2 + u_r^2\right)^2}{\frac{u_f^4}{\infty} + \frac{u_r^4}{\nu_r}} = \nu_r \frac{\left(u_f^2 + u_r^2\right)^2}{u_r^4} = \nu_r \left(\frac{u_f^2}{u_r^2} + 1\right)^2$$

$$= (N-1)\left(\frac{u_f^2}{u_r^2} + 1\right)^2 = (N-1)\left[N\left(\frac{u_f}{\sigma_r}\right)^2 + 1\right]^2 \tag{3.3}$$

式(3.3)を変形して

$$\frac{\sigma_r}{u_f} = \sqrt{\frac{N}{\sqrt{\frac{\nu_{eff}}{N-1}} - 1}} \tag{3.4}$$

$\nu_{eff} = 9$ を代入して計算すると表 3.1 が得られる。

(3) 表 3.2 の計算

① 式(3.3)を用いて、繰り返し回数Nと$\frac{\sigma_r}{u_f}$から有効自由度ν_{eff}を求める。

② 式(3.5)により、有効自由度ν_{eff}に対する 95%信頼区間の t 値を求める。

$$T_{INV}(\nu_{eff}) = \mathrm{SQRT}(\nu_{eff}/\mathrm{BETAINV}(0.05,\ \nu_{eff}/2,1/2) - \nu_{eff}) \tag{3.5}$$

ここで、BETAINV は Excel の組み込み関数で、累積 β 確率密度関数の逆関数。Excel 組み込みの関数 TINV は、与えた有効自由度を整数に切り捨てて処理するため、代替として小数有効自由度を与える式(3.5)を使用する。

出典：http://aoki2.si.gunma-u.ac.jp/Hanasi/StatTalk/arc-s001.html

以上

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

今回の改正のポイント

◇組織改編に伴う名称の変更等

以上

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。